

Erkka Tikkanen

KEMIALLISTEN RASITUSTEN VAIKU- TUS BETONIN VAURIOITUMISEEN

Rakennetun ympäristön tiedekunta
Kandidaatintyö
Toukokuu 2019

TIIVISTELMÄ

Erkka Tikkanen: Kemiallisten rasitusten vaikutus betonin vaurioitumiseen
(Damage to concrete due to chemical stress)
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma
Toukokuu 2019

Tässä kandidaatintyössä käsitellään teollisuuden, maaperän, vedenkäsittelyn sekä elintarviketeollisuuden tyypillisiä kemikaaleja sekä niiden aiheuttamia vaurioita betonirakenteelle. Työn tarkoituksena on koota otsikon mukainen tietopaketti kattavasti eri lähteistä keskittymällä betonin valmistuksen ja betonirakenteen suunnittelun kannalta oleellisiin asioihin. Työn tarkoitus ei täten ole mennä kemiallisten prosessien tutkimisessa kovin syvälle.

Työn alussa käydään yleisellä tasolla läpi edellä mainituissa kohteissa ilmeneviä betonille aggressiivisia kemikaaleja sekä niiden vahingollisuutta betonille. Tämän jälkeen tarkastellaan kemikaalien vauriomekanismeja, edellytyksiä niiden käynnistymiselle sekä niihin vaikuttavia tekijöitä.

Työn seuraavassa vaiheessa selvitetään betonin runko- ja sideaineeseen lisättävien seosainesten sekä eri tyyppisten pinnoitteiden vaikutusta kemikaalikestävyyteen. Seosaineista käsitellään lentotuhka, masuunikuona ja silika. Pinnoitteiden käsittely painottuu polymeeripinnoitteisiin.

Työn loppupuoliskolla tutkitaan sekä sisäisten, että ulkoisten tekijöiden vaikutusta vaurioitumisnopeuteen. Sisäiset tekijät käsittävät tässä tapauksessa betonin fysikaaliset, että kemialliset ominaisuudet. Ulkoisten tekijöiden tapauksessa käydään läpi, miten ympäristöolosuhteet vaikuttavat rasitusluokan valintaan.

Työn viimeinen kappale käsittelee kemiallisesti rasituksista aiheutuneiden vaurioiden tutkimistapoja. Samasta kappaleesta löytyy myös hyvä taulukko vaurioiden tutkimustavoista sekä arvio niiden soveltuvuudesta korjaushankkeen eri vaiheissa.

Avainsanat: Korroosio, hydrataatio, huokoisuus, seosaine, reaktio

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. KEMIALLISET RASITUKSET.....	3
2.1 Teollisuus.....	3
2.2 Maaperä.....	4
2.3 Vedenkäsittely.....	5
2.4 Elintarviketeollisuus.....	7
3. VAURIOMEKANISMIT	8
3.1 Ioninvaihto	8
3.2 Liuos	8
3.3 Paisutus	9
3.4 Teräskorroosio	10
4. BETONILAATUJEN VAIKUTUS VAURIOITUMISEEN	13
4.1 Seosaineet	13
4.2 Pinnoitteet	15
5. VAURIOITUMISNOPEUTEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	17
5.1 Sisäiset tekijät	17
5.2 Ulkoiset tekijät	17
6. VAURIOIDEN TUTKIMISTAVAT	19
7. YHTEENVETO.....	21
LÄHTEET	22

1. JOHDANTO

Betonin kemiallisen rasitusluokan määrittäminen on tärkeää rakennettaessa esimerkiksi teollisuustiloja. Standardi SFS-EN 206 ”Betoni. Määrittely, ominaisuudet, valmistus ja vaatimustenmukaisuus” (2016, s. 21–22) määrää betonirakenteen rasitusluokan välille XA1-3 sen mukaan kuinka aggressiivisesta rasituksesta on kyse. Se kuitenkin huomioi ainoastaan maaperästä tai pohjavedestä aiheutuvat rasitukset. Kemiallisia rasituksia voi kuitenkin aiheutua myös teollisuudessa käsiteltävistä kemikaaleista, käyttö- ja jätevesistä sekä elintarviketeollisuuden tuotteista. Kun ympäristössä on muita kemiallisesti aggressiivisia aineita, on syytä selvittää erikseen ympäristöolosuhteet. (SFS-EN 206, s. 21–22)

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on selvittää erilaisten kemiallisten rasitusten vaikutus betonin vaurioitumiseen. Työn tutkimusmenetelmänä toimii kirjallisuustutkimus. Iso osa työssä hyödynnettävästä materiaalista on Suomen Betoniyhdistyksen julkaisemaa kirjallisuutta, mutta tämän lisäksi työn teossa on hyödynnetty muutamia väitöskirjoja sekä kotimaisia, että ulkomaisia lehti- ja tutkimusartikkeleita.

Jotta voitaisiin selvittää rasitusten vaikutus, täytyy ensin määrittää tyypillisiä betonille haitallisia kemikaaleja ja kemiallisia yhdisteitä. Työssä käsitellään teollisuuden osalta yleiset aggressiiviset hapot kuten rikki-, suola- ja typpihapot. Maaperän haittatekijöiden osalta käsitellään sulfaattimaat sekä maan suuri hiilidioksidipitoisuus. Jäteveden käsittelyssä esiin nostetaan rikkivetykaasu. Samalla käsitellään myös meriveden kloridit sekä sivutaan alkali-kiviainesreaktiota, jota kosteat olosuhteet edesauttavat. Lopuksi tarkastellaan elintarviketeollisuuden heikkojen happojen sekä erilaisten sokerien betonia vaurioittavia ominaisuuksia.

Jotta kemiallisilta rasituksilta voidaan mahdollisimman hyvin suojautua, on niiden vaurio- mekanismit hyvä tuntea pääpiirteittäin. Luku 3 käsittelee vauriomekanismeja, joista tämän työn kannalta oleellisia ovat ioninvaihto, liuotus, paisutus sekä teräskorroosio. Luvussa 4 selvitetään, miten betonin pinnoittamisella sekä side- ja runkoaineksen koostumusta muuttamalla voidaan vaikuttaa betonin kemikaalikestävyYTEEN.

Rakenteen suunnittelun kannalta on hyvä tuntee vaurioitumista nopeuttavia tekijöitä. Tämän lisäksi on tärkeää osata tunnistaa alkavat tai jo pitkälle edenneet vauriot, jotta osataan valita oikeat korjaustoimenpiteet. Luvut 5 ja 6 käsittelevät betonin vaurioitumisnopeuden vaikuttavia sisäisiä ja ulkoisia tekijöitä sekä vaurioiden tutkimistapoja.

2. KEMIALLISET RASITUKSET

2.1 Teollisuus

Betoni on suosittu ja yksi laajimmin käytetyistä rakennusmateriaaleista teollisuudessa sen lujuuden, kestävyuden ja kustannustehokkuuden takia (Davies 2005, s. 32). Teollisuudessa betonia rasittavat erilaiset hapot sekä sulfaattiyhdisteet.

Kaikkia epäorgaanisia happoja voidaan pitää betonille vahingollisena, sillä ne syövyttävät betonipintaa. Tyypillisiä teollisuudessa esiintyviä happoja ovat rikki-, suola- ja typpi-hapot. Se, kuinka nopeasti happo vaurioittaa betonia, riippuu sen aggressiivisuudesta. Lisäksi vaurioitumiseen vaikuttaa hapon määrä sekä aika, jonka se ehtii olla kosketuksessa betonin kanssa. (BY201 2018, s. 132) Vahvat, matalan pH:n hapot dissosioituvat täysin vesiliuoksessa (Asp-Lehtinen 2018). Happo on sitä aggressiivisempää, mitä alhaisempi sen pH on. Lisäksi aggressiivisuuteen vaikuttaa myös aineen kemiallinen koostumus, pitoisuus sekä lämpötila. (BY68 2016, s. 23, 90) Vaurioituminen tapahtuu pääasiassa betonin pinnassa, mutta jos happo pääsee betonin huokosverkostoon, voi se vaurioittaa myös sisempiä rakenteita. Erityisen vaarallisen voidaan pitää rikkihappoa, sillä sen reaktiotuotteina syntyvät sulfaatit reagoivat sementin trikalsiumalumiinaatin (C₃A) kanssa aiheuttaen paisumisvaurioita. Sementtilaadun valinnalla on vain pieni vaikutus betonin haponkestävyyteen, ja ainoa tapa suojata betoni aggressiivisilta kemikaaleilta on pinnoittaminen. (BY201 2018, s. 132–133)

Teollisuudessa käsiteltävät mineraaliöljyt, kuten polttoaineet ja moottoriöljyt, eivät aiheuta vahinkoa kovettuneelle betonille, mutta voivat aiheuttaa vakavia vaurioita tuorelle betonille. Polttoaineet eivät itsessään sisällä mitään, mikä reagoisi kovettuneen betonin kanssa, mutta tuoreen betonin tapauksessa öljyt vaikeuttavat veden sekoittumista sekä hydrataatioreaktioa. (Hewlett 2001, s. 338) Öljyt kiinnittyvät sementtahiukkasten pinnalle estäen hydrataatioreaktion tai heikentäen tartuntaa runkoaineisiin. Ne voivat myös aiheuttaa ylimääräistä ilmaa betoniin. (BY201 2018, s. 59)

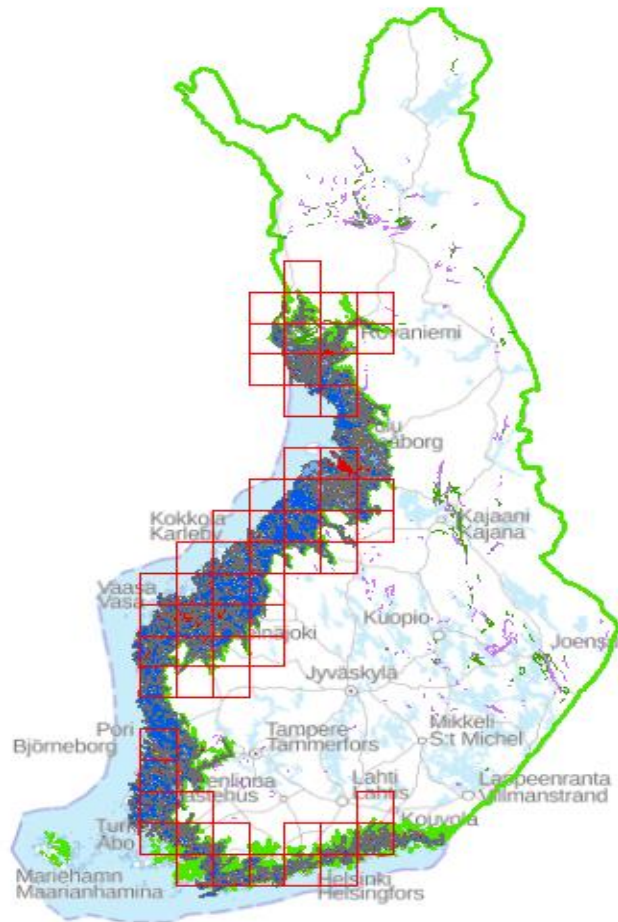
Etenkin paperiteollisuuden valmistusprosesseissa käytetyt sulfaatit ja sulfidit ovat betonille haitallisia. Altistus näille voi aiheutua esimerkiksi vuodon seurauksena. Vaikka teollisuuden lattiat ovatkin yleensä kaakeloituja, hajoaa pinnoite altistuksen yhteydessä. Paperin valkaisuun käytettävät kloridit ja hapot aiheuttavat ongelmia betoniteräksille. (Davies 2005, s. 32) Sulfaattien vahingollisuus betonille perustuu sen sijaan niiden aiheuttamiin tilavuuden muutoksiin betonirakenteissa (BY201 2018, s. 133). Vauriomekanismeihin perehdytään tarkemmin luvussa 3.

2.2 Maaperä

Suomen maaperän sulfaattipitoisuus voi aiheuttaa rasituksia betonirakenteille. Aggressiivisia sulfaattimaita on pääosin rannikkoalueilla noin 100 metrin korkeuskäyrän alapuolella Pohjois-Suomessa sekä 40 metrin korkeuskäyrän alapuolella Etelä-Suomessa, ja ne ovat usein liejupitoisia savia, hiesuja ja hietaa. Osa sulfaattimaista ei aiheuta haittaa ollessaan pohjaveden alla hapettomassa tilassa. Maankäytön ja -kohoamisen seurauksena pohjavedenpinta voi päästä laskemaan, jolloin maaperän sulfidit pääsevät hapetumaan ja happamoitumaan. Sulfaattimaiden aiheuttamat ongelmat ovat usein vain pohjaveden yläpuolella olevissa rakenteissa. Erityisesti sulfaattimaat rasittavat maanvastaisia rakenteita, kuten paaluja ja anturoita. (BY68 2016, s. 24–26)

Maaperässä syvällä kovassa paineessa veteen on voinut liueta normaalia suurempi määrä hiilidioksidia (CO_2). Näin on voinut muodostua hiilihappoa, jonka pH on jopa 3,8 normaalin hiilihapon pH:n ollessa noin 5,7. Hiilidioksidi reagoi betonin kalsiumhydroksidin ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) kanssa muodostaen liukenematonta kalsiumkarbonaattia (CaCO_3). Reaktion jatkuessa pidempään muodostuu myös liukenevaa kalsiumvetykarbonaattia ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$). Kalsiumvetykarbonaatti reagoi edelleen kalsiumhydroksidin kanssa muodostaen lisää kalsiumkarbonaattia (Hewlett 2001, s. 330) Reaktio kuluttaa betonin emäksisyyttä ylläpitävää kalsiumkarbonaattia, jolloin betonin pH laskee ja se karbonatisoituu (BY201 2018, s. 113). Emäksisyyden lasku heikentää myös betoniraudoitteiden korrosiosuojaa. Teräskorroosiota on käsitelty tarkemmin luvussa 3.4.

Maaperän laatu todetaan pohjatutkimuksilla. Aggressiivisten olosuhteiden tapauksessa riskiä voidaan arvioida maa- ja pohjavesinäytteistä, jos maaperä on hyvin vettä läpäisevää. Huonosti vettä läpäisevän maan tapauksessa suositellaan pohjatutkimuksia tehtäväksi maanäytteistä. Joissain tapauksissa riittää myös historiatietojen perusteella tehty tutkimus, jos ei epäillä maaperän pilaantumista. Esimerkiksi kuvan 1 perusteella voidaan suorittaa alustava arvio siitä, sijoittuuko rakennuspaikka sulfaattimaa-alueelle. (RIL 254-2016, s. 42)



Kuva 1. Geologian tutkimuskeskuksen kartoitus sulfaattimaiden esiintyvyydestä (Geologian tutkimuskeskus).

2.3 Vedenkäsittely

Vedenkäsittelyprosessissa jäteveden sisältämät kemikaalit sekä jätevesiputkistossa syntyvät kaasut vaurioittavat betonirakennetta. Vaurioitumisnopeutta lisää jäteveden virtaus, sillä hapon ja betonin välisen reaktion tuotteina muodostuvat suolat liukenevat paremmin virtaavaan kuin seisovaan liuokseen (BY201 2018, s. 132).

Jätevesiputkissa muodostuva rikkihappo (H_2SO_4) syövyttää putkiston betonia. Rikkihappoa syntyy, kun suljetun putkiston pohjalle kertyy lietettä, joka alkaa bakteeritoiminnan vaikutuksesta kehittää rikkivetyä. Rikkivety (H_2S) kulkeutuu putkiston seinämille, joissa pinnan bakteerit hapettavat sen rikkihapoksi. Rikkivedyn muodostuminen voidaan minimoida järjestämällä riittävä kaltevuus putkistoon, jolloin veden suuremman virtausnopeuden johdosta lietettä ei pääse muodostumaan. (BY201 2018, s. 135–136) Lisäksi tulee

huolehtia riittävästä tuuletuksesta, jotta mahdollisesti syntyvä rikkivety pääsee poistumaan. Tuuletuksen toinen tarkoitus on kuivattaa ilmatilassa olevat pinnat, jolloin rikkivety ei pääse hapettumaan. Saman tyyppistä biologista räsitusta on havaittavissa myös betonisissa jätevesisäiliöissä. (BY68 2016, s. 27–28)

Merivedelle alttiit rakenteet joutuvat kemialliset rasituksen kohteeksi meriveden sisältämän kloridin vaikutuksesta. Barnesin ja Benstedin (2008, s. 295, 298) mukaan kloridi-ionien (Cl⁻) kyky tunkeutua betoniin on hyvä ja tästä syystä myös niiden aiheuttamat vauriot betonirauδοitteissa näkyvät suhteellisen nopeasti. Pienen vesi-sementtisuhteen betoneilla kloridi-ionien diffuusion on huomattu olevan hitaampaa, koska betonin kapillaarisuus on vähäistä. (Barnes & Bensted 2008, s. 295, 298) BY 65 Betoninormit -kirjassa (2017, s. 37) esitetyssä taulukossa kloridirasitetulle 50 vuoden käyttöiän betonille on määrätty vesi-sementtisuhte välille 0,45–0,55 riippuen rasituksen voimakkuudesta ja siitä, ovatko kloridit peräisin merivedestä vai muualta. Kun betonin vesi-sementtisuhte on pieni, siinä on vähemmän kloridien tunkeutumista edistäviä kapillaarihuokosia eikä huokosverkosto ole yhtenäinen (BY201 2018, s. 115–116). Esimerkiksi siltarakenteille voi aiheutua kloridirasitusta veden virtauksen, roiskeiden, vesisumun ja lumen aurauksen kautta. Muita rasituksille alttiita rakenteita ovat muun muassa meluseinät, parkkihallien rakenteet, pysäköintitasot ja laiturirakenteet.

Kriittiselle kloridipitoisuudelle määritetty raja on 0,03...0,07 % betonin painosta riippuen muun muassa käytetystä betonista sekä sementtimäärästä. (BY201 2018, s. 115) Erityisen korroosioherkkiä raudotteita ovat enintään 4 mm halkaisijaltaan olevat terästangot tai sellaiset kylmämuovattut teräslaadut, joiden pitkäaikainen jännitystaso on yli 400 MPa (Iso-Mustajärvi 2016, s. 196). Tämä näkyy muun muassa siten, että jännitetyn betonirakenteen betonia valmistettaessa veden suurin sallittu kloridimäärä on 500 mg/l, kun tavallisilla raudoitetuilla betonirakenteilla se on 1000 mg/l (BY201 2018, s. 59). Lisäksi vaaditut betonipeitteen arvot, rasitusluokkaa X0 lukuun ottamatta, ovat aina 10 mm suurempia jänneteräkselle kuin tavalliselle betoniteräkselle (BY68 2016, s. 35).

Kosteat olosuhteet edesauttavat myös alkali-kiviaineisreaktion, etenkin alkali-piiksidireaktion (ASR) tapahtumista. Lisäksi edesauttavana tekijänä reaktiolle toimii suolojen tunkeutuminen betoniin. Reaktiossa syntyvän alkali-silikaattigeelin ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}_2\text{H}_2\text{SiO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ tai H-S-H) muodostuminen paisuttaa reaktioon osallistuvaa kiviainesta sekä kuivattaa betonin pintaa. Tämä taas aiheuttaa betonin rapautumista. (BY201 2018, s. 134)

2.4 Elintarviketeollisuus

Elintarviketeollisuuden orgaaniset, heikot hapot syntyvät usein jonkin valmistusprosessin osana ja päätyvät jäteveden mukana rasittamaan betonirakenteita. Jätevedet sisältävät tyypillisesti useita eri happoja, jotka yhtäaikaisesti rasittavat betonirakennetta eikä niiden rasitusta voida suoraan pitää yksittäisten tekijöiden summana. Rasituksia arvioitaessa tulisi siis tarkastella yksittäisen hapon rakennetta sekä sen ominaisuuksia ennen koko seoksen tarkastelua. (Larreur-Cayol et al. 2011, s. 882)

Maidon sekä voin valmistuksessa syntyvät maito- ($C_3H_6O_3$) ja voi happo ($C_4H_8O_2$) voivat laskea jäteveden pH:n jopa 4:ään. Näiden valmistuksessa ei käytetä betonisäiliöitä, mutta ne voivat vaurioittaa betonilattian pintaa. Perinteisen Portlandin sementin käytöllä voidaan parantaa betonin kestävyyttä tällaista rasitusta vastaan. (Hewlett 2001, s. 335)

Tehtaissa, jossa käsitellään hedelmiä, voivat betonilattiat altistua hedelmien sisältämälle glukosille (rypälesokeri) ja fruktoosille (hedelmäsokeri). Näitä sisältäviä tuotteita ovat esimerkiksi tuoremehut, hunaja sekä sakkaroosi (ruokosokeri). Sokeri reagoi betonin kalsiumhydroksidin kanssa muodostaen kalsiumsakkaraattia ($C_6H_8CaO_8$). Suuren tai pitkäkestoisen altistuksen tapauksessa kalsiumhydroksidin väheneminen tuhoaa rakenteen ja johtaa sen lujuuden heikkenemiseen. (Hewlett 2001, s. 336)

Hapon aggressiivisuus on suoraan kytköksissä sen muodostamien suolojen liukoisuuteen. Jos hapon muodostama kalsiumsuola on liukeneva, ovat syövyttävät reaktiot samankaltaisia kuin vahvojen happojen tapauksessa. Tällaisia happoja ovat esimerkiksi maito- ja etikkahappo ($C_2H_4O_2$). Sen sijaan, jos muodostuvat kalsiumsuolat ovat huonosti tai kokonaan liukenemattomia, ovat vauriomekanismit huonosti tiedossa. Huonosti tai kokonaan liukenemattomia suoloja muodostavat esimerkiksi viinihappo ($C_4H_6O_6$), sitruunahappo ($C_6H_8O_7$) sekä meripihkahappo ($C_4H_6O_4$). (Larreur-Cayol et al. 2011, s. 882)

3. VAURIOMEKANISMIT

3.1 Ioninvaihto

Ioninvaihdossa kiinteään aineeseen, tässä tapauksessa betonin, ionit reagoivat liuoksessa olevien ionien kanssa. Reaktio jatkuu niin pitkään, kunnes liuos on kyllästynyt. Ioninvaihtoreaktio on reversiibeli, eli se voi toimia molempiin suuntiin. (Shun Dar Lin 2014, Public Water Supply mukaan)

Ioninvaihtoreaktio toimii muiden vauriomekanismien kanssa yhdessä vahingoittaen sementtikiven sisäistä rakennetta. Hapot reagoivat betonin kalsiumyhdisteiden kanssa muodostaen kalsiumsuoloja. Vahvat hapot syövyttävät betonin kaikkia kalsiumyhdisteitä, kun taas heikot reagoivat ainoastaan kalsiumhydroksidin kanssa. Esimerkiksi magnesiumsulfaatin (MgSO_4) sisältämä magnesiumiumioni (Mg^{2+}) muuttaa betonin kalsiumyhdisteitä ioninvaihtoreaktiossa magnesiumiumyhdisteiksi saostuen samalla betonin huokosiin magnesiumiumhydroksidina ($\text{Mg}(\text{OH})_2$). Muodostuvilla yhdisteillä ei ole enää samoja sideominaisuuksia kuin alkuperäisillä ja näin betonin lujuus heikkenee. Jotkin hapot voivat aiheuttaa niin vaikealiukoisien saostumien betonin pinnalle, että sen korrosio pysähtyy. Ioninvaihto tapahtuu tyypillisesti betonin pinnassa ja ainoa tapa suojata betoni on käyttää pinnoitusta. (BY201 2018, s. 132–133) Kasviöljyjen samoin kuin sokeriliuosten vahingollisuus betonille perustuu puhtaasti ioninvaihtoreaktioon (BY68 2016, s. 92).

3.2 Liuotus

Liuotus on diffuusioreaktio, joka tyypillisesti tapahtuu betonin altistuessa heikosti mineraalipitoiselle tai happamalle vedelle. Vahingot aiheutuvat kalsium- ja hydroksidi-ionien liukenemisestä, mikä johtaa betonipinnan huokoisuuden kasvuun. Liukeneminen tapahtuu nopeammin happamissa sekä neutraaleissa liuoksissa ja sen yhteydessä aggressiiviset ionit kuten kloridi, sulfaatti ja magnesium voivat päästä vaurioittamaan betonia. (Rozière et al. 2009, s. 1188)

Betonin liukenemistä voi tapahtua myös esimerkiksi pehmeän veden vaikutuksesta. Pehmeä vesi on sateesta sekä lumen- ja jäänsulamisesta muodostunutta ja sisältää vain vähän kalsiumia. Se liuottaa betonin pinnassa olevaa kalsiumhydroksidia muodostaen kalkkihärmettä eli kalsiumkarbonaattia. Liukenemistä tapahtuu niin pitkään, että kemiallinen tasapaino saavutetaan. Tämänkin jälkeen reaktio voi jatkua, jos vesi on virtaavaa ja kylläinen liuos pääsee poistumaan. Tämän tyyppisen vauriot ovat kuitenkin vain esteettisiä. (BY201 2018, s. 132)

Liuottumisen vaikutuksia voidaan minimoida käyttämällä pientä vesi-sementtisuhdetta betonin valmistuksen aikana sekä pidentämällä betonin jälkihoitoa. Betonin liuotuksenkestoa voidaan myös parantaa käyttämällä seosaineita. Tutkimuksissa on havaittu, että lisäämällä 40% lentotuhkaa, 70% masuunikuomaa tai 10% silikaa saadaan läpäisemättömämpi sisärakenne, joka kestää liuotusta paremmin. Seosainelisäyksen seurauksena seosaineen mineraalit reagoivat kalsiumhydroksidin kanssa muodostaen kalsiumsilikaattihydraattigeeliä ($C_3S_2H_3$, myös C-S-H). Geeli muodostaa betonille läpäisemättömämmän sisärakenteen. (Arel et al. 2017, s. 391)

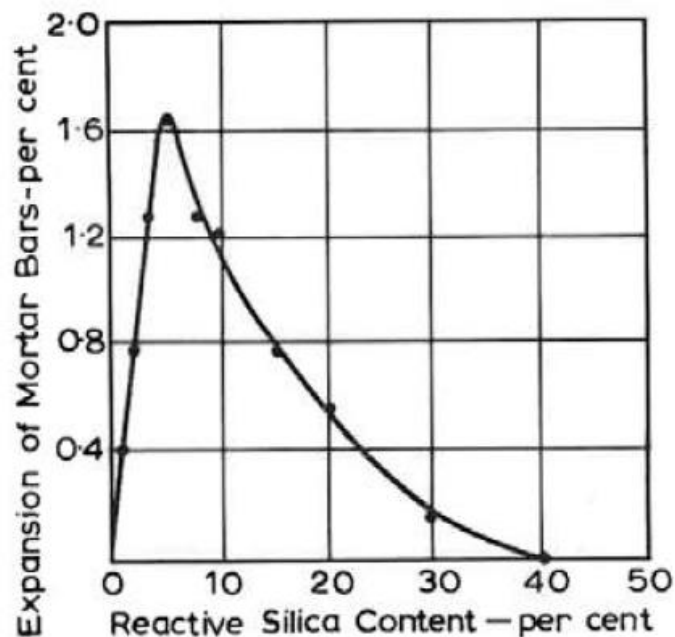
3.3 Paisutus

Paisumisen aiheuttamat vauriot betonille perustuvat tilavuudenmuutoksiin, etenkin tilavuuden kasvuun. Reaktiossa lähtöaineet muodostavat tilavuudeltaan suuremman määrän reaktiotuotteita, jotka betonin sisälle muodostuessa aiheuttavat halkeamia ja rapautumista. Halkeamien synty edellyttää, että betonin vetolujuus ylittyy. (BY201 2018, s. 132)

Ettringiitti ($C_6A\bar{S}_3H_{32}$) on tärkeä Portlandin sementin hydrataatio tuote, joka vaikuttaa betonin lujuuden kehitykseen sekä pitkän ajan vakauteen (Clark et al. 2008, Lahdensivu 2012 mukaan). Myöhäisvaiheen ettringiitti muodostuu, kun sulfaattimineraalit reagoivat kovettuneen sementin kanssa. Reaktion seurauksena syntyy lähtöaineita suurempi tilavuus reaktiotuotteita. (Lahdensivu 2012, s. 33) Kristallisoituneen kiinteän ettringiitin tilavuus voi kasvaa 130-140 % verrattuna lähtöaineisiin ja tämän seurauksena paine huokosissa voi olla jopa 55,5 MPa (Deng & Tang 1994, Lahdensivu 2012 mukaan). Ettringiitin muodostumisen syynä on pääosin aina betonin liiallinen lämpökäsittely ja kriittisenä rajana ettringiitin syntyyn pidetäänkin +70 °C. Lisäksi vaaditaan pitkäaikaista kosteusra- situsta sekä mikrohalkeamia, joihin ettringiitti voi kiteytyä. Mikrohalkeamien synnyn on voinut aiheuttaa muista syistä johtuva tilavuudenmuutos kuten nopea lämpötilan vaihtelu, kuivumiskutistuma tai ulkopuolinen kuormitustekijä. Ulkokautta tulevien sulfaattiyhdisteiden lisäksi myös betonin kiviaineksen tai sementin sisältämät sulfaatit voivat aiheuttaa betoniin paisuntavaurioita. (BY201 2018, s. 133–134)

Paisumisvaurioita voi aiheuttaa myös alkali-piiksidireaktio. Reaktiossa muodostuu alkali-silikaattigeeliä, joka koostuu piiksidista (SiO), natriumista, kaliumista, kalsiumista ja vedestä ja sen tilavuus on huomattavasti piiksidin tilavuutta suurempi. Pienen sekä suuren kalsiumpitoisuuden omaavat geelit eivät aiheuta paisumista. Kuten ettringiitin muodostuminen, myös alkali-silikaattireaktio vaatii suuren kosteuspitoisuuden. Tyypillisesti paisumista tapahtuu vasta kun sekä betonin ulkoinen, että sisäinen suhteellinen kosteus on noin 90 – 95%. Alkali-silikaatin paisutusvaikutukseen on esitetty kahta eri teoriaa.

Ensimmäisen mukaan geelin tilavuuden kasvu aiheutuu, kun se absorboi betonin huokosissa olevaa vettä. Toisen teorian mukaan betonin huokosiin muodostuu hydraulinen paine. (Barnes & Bensted 2008, s. 265–266) Reaktio voi pysähtyä, jos reaktiivinen kiviaines on reagoinut kokonaan, alkalisuus laskee alle tietyn tason tai betonin suhteellinen kosteus laskee alle 80 %:n. Lisäalkalilähteinä reaktiolle voivat toimia esimerkiksi liukkauden torjuntaan käytetyt suolat ja lipeä. Tämän lisäksi reaktioherkkyyttä kasvattaa korkea lämpötila. (Pyy 2018, s. 92) Reaktio on luonteeltaan hidas, mutta jos runkoaineena on silikapitoista kiviainesta, voi reaktio kehittyä jopa 2-5 vuoden aikana (Lahdensivu et al. 2018, s. 34). Kuvassa 2 on esitetty sementtilaastin laajeneminen reaktiivisen silikapitoisen runkoaineen määrän funktiona.



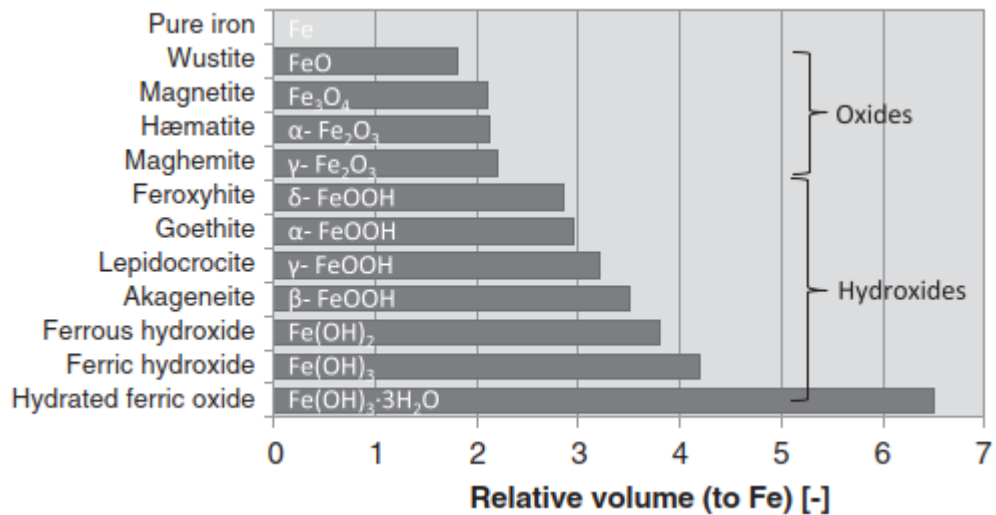
Kuva 2. Laajeneminen silikapitoisuuden funktiona (Neville 1995, Lahdensivu et al. 2018 mukaan, s. 35).

Kuvasta nähdään, että pienillä silikapitoisuuksissa alkalisilikaattireaktion aiheuttamat laajenemiset ovat suuria. 20 % jälkeen laajenemiset pienenevät huomattavasti. Silikapitoisuutta säätelemällä voidaan siis pienentää reaktion riskiä betoniudisrakentamisessa. (Lahdensivu et al. 2018, s. 35)

3.4 Teräskorroosio

Betoniterästen korroosio voi käynnistyä joko karbonatisoitumisen tai kemiallisten yhdisteiden sisältämien kloridi-ionien vaikutuksesta. Korroosio itsessään on sähkökemiallinen ilmiö, jossa raudan yhdisteet pyrkivät muuttumaan niiden luonnolliseen muotoon esimer-

kiksi oksideiksi (O^{2-}) ja hydroksideiksi (OH^-). Korroosio aiheuttaa betoniteräksen poikkileikkauksen pienenemisen, kun siitä liukenee pois materiaalia. Pienentynyt poikkipinta-ala johtaa rakenteen heikentyneeseen kestävyys. Korroosiotuotteiden tilavuus riippuu korroosiotavasta (Köliö et al. 2015, s. 200). Tutkimuksissa on havaittu, että kosteissa olosuhteissa syntyvät korroosiotuotteet ovat hydroksideja, kun taas kuivissa olosuhteissa tuotteet ovat erilaisia oksideja (Hansson & Marcotte 2007, Köliö et al. 2015 mukaan) Kuvasta 3 voidaan nähdä korroosiotuotteiden kemiallisen koostumuksen vaikutus niiden vaatimaan tilavuuteen.



Kuva 3. Korroosiotuotteen kemiallisen koostumuksen vaikutus sen vaatimaan tilavuuteen (Köliö et al. 2015, s. 201).

Korroosiotuotteet aiheuttavat vetojännityksiä ja tämä saa aikaan betonipeitteen halkeilua tai suojabetonikerroksen irti lohkeamista. Syöpymissyvyys riippuu raudoitettangon halkaisijan ja betonipeitteen paksuuden suhteesta sekä betonin lujuudesta. (Mattila & Pentti 2004, s. 10) Köliön (2016, s. 41) väitöskirjan mukaan betonipeitteen suhteen raudoitettangon halkaisijaan ollessa alle 1,5 teräskorroosion aiheuttamat vauriot näkyivät betonissa pintasäröilynä. Jos taas suhde on reilusti yli 1,5, on todennäköisempää, että vauriot ovat selkeää halkeilua. (Köliö 2016, s. 41)

Betoni suojaa teräksiä emäksisen ympäristönsä ansiosta. Lisäksi raudoite muodostaa emäksisessä ympäristössä itselleen oksidikalvon. Korroosion käynnistyminen raudoitteessa vaatii sen, että betonin fysikaalista tai kemikaalista suojavaikutusta häiritään. Jos betoni rapautuu tai halkeilee, voivat kloridit tunkeutua betoniin ja edistää raudoitteiden korroosiota. Kloridien vahingollisuus raudoitteelle perustuu sen kykyyn poistaa raudoitteelta sitä suojaava oksidikalvo. Karbonatisoituminen perustuu ilman sisältämän hiilidi-

oksidin betonia neutraloivaan vaikutukseen. Betonin pH laskee ja sen raudoitteita suojaava emäksisyys heikkenee. Kun reaktio on edennyt raudoitteen pintaan, alkaa korrosio. (BY201 2018, s. 108–109) Karbonatisoitumista ei käsitellä tässä työssä enempää vaan keskitytään enemmän muihin kemiallisiin rasituksiin.

Korrosio vaatii käynnistyäkseen myös betonin riittävän kosteuspitoisuuden. Reaktio on nopeimmillaan ilman kosteuden ollessa noin 95%. Lisäksi happea täytyy kulkeutua riittävästi raudoitteen läheisyyteen. Kaikkein suurin riski korroosiolle on, kun rakenne altistuu vuoroin kastumiselle ja vuoroin kuivumiselle. Myös lämpötilan nousu vaikuttaa korrosionopeuteen. Kun lämpötila kasvaa 20 °C, korrosionopeus kymmenkertaistuu. (BY201 2018, s. 109–110)

Kloridien aiheuttamaa korroosiota sanotaan pistekorrosioksi, sillä se aiheuttaa pinta-alaltaan pieniä syöpymisiä raudoitteessa. Tämä johtuu siitä, että reaktiossa raudoituksesta syöpyvä alue, anodi, on pinta-alaltaan pieni, kun taas katodi on pinta-alaltaan suuri. Klorideilla on syöpymistä nopeuttava vaikutus, sillä ne eivät kulu reaktiossa. Tästä syystä ne voi aiheuttaa raudoitetangon paikallisia syöpymisiä suhteellisen nopeasti. Korroosiolle on tapana käynnistyä herkimmin halkeamien kohdalta ja kloridien vaikutuksesta käynnistyneelle korroosiolle ovat sekä raudoitteen suuntaiset kuin sitä vastaan kohtisuorat halkeamat yhtä haitallisia. (BY201 2018, s. 109) Kriittisen Cl^-/OH^- -rajan, jossa raudoitteen passiivikalvo tuhoutuu ja korrosio alkaa, on tutkittu olevan 0.6. Korrosiotuotteiden muodostuminen voi hidastaa käynnissä olevaa korroosiota. Kloridien aiheuttama korrosio voi tapahtua jopa suhteellisen emäksisissä olosuhteissa pH:n ollessa noin 12. (Barnes & Bensted 2008, s. 307) Taulukkoon 1 on koottu erilaisia betonin kemiallisia vauriotekijöitä, niiden vauriomekanismeja sekä niiden vaikutuksia betonirakenteissa.

Taulukko 1. Betonin kemiallisia vauriotekijöitä, vauriomekanismeja ja niiden vaikutuksia betonirakenteissa (BY201 2018, s. 131).

Kemialliset vauriotekijät	Mekanismi	Vaikutus
Pehmeä vesi	liukeneminen	betonin raupautuminen
Happo	liukeneminen	betonin raupautuminen
Happo	neutraloituminen	teräskorroosion aktivoituminen
Happamat kaasut: hiilidioksidi, rikki- ja typpioksidit	neutraloituminen karbonatisoituminen	teräskorroosion aktivoituminen mikrorakenteen epäedullinen muuttuminen
Kloridit	passiivikalvon rikkoutuminen	teräskorroosion aktivoituminen
Aktiivivilassa olevat terästangot + happi + vesi	korrosio	terästankojen paisuminen, pinta-alan ja tartunnan menetykset
Jännitys, kloridit	jännityskorrosio (vetyhaurastuminen)	jänneraudoitteiden katkeaminen
Sulfaatit, merivesi, maaperä	kiteytymispaine kemialliset muutokset	betonin paisuminen betonin rapautuminen
Alkalit, silikaattikiiviaines	alkali-piilihapporeaktio alkali-silikaattireaktio	betonin paisuminen betonin rapautuminen
Alkalit, karbonaattikiiviaines	karbonaattireaktio	betonin paisuminen betonin rapautuminen

4. BETONILAATUJEN VAIKUTUS VAURIOITUMISEEN

4.1 Seosaineet

Tyypillisiä betonin runko- tai sideaineeksi lisättäviä seosaineita ovat lentotuhka, masuunikuonajauhe, jauhegranuloitu, pelletoitu tai ilmajäädytetty masuunikuona, ilmajäädytetty ferrokromikuona sekä silika. Näistä pozzolaanisia seosaineita ovat lentotuhka sekä silika. Pozzolaaniset seosaineet reagoivat betonin kalsiumhydroksidin kanssa muodostaen kalsiumsilikaattigeeliä. Seosaineiden lisäyksellä voidaan vaikuttaa betonin kemikaalikestävyyteen monin eri tavoin, mutta koska seosaineiden lisäyksellä on myös betonin ominaisuuksia heikentäviä vaikutuksia, on niiden käytölle määritelty enimmäismäärät riippuen rasitusluokasta sekä muista yksittäisistä seosaineista. (BY201 2018, s. 56–58) Taulukossa 2 on esitetty suurimmat sallitut seosainelisäykset rasitusluokittain eri seosaineille.

Taulukko 2. Suurimmat sallitut seosainemäärät rasitusluokittain (BY201 2018, s. 58).

Rasitusluokka	Suurin sallittu seosainelisäys [%]		
	Masuunikuona	Lentotuhka	Silika
X0 XC1	$\frac{(100 - k_s - 0,053k_s) - 1,00 \text{ lt} - 9,0 \text{ sil}}{0,053}$	$\frac{(100 - k_s - 1,00 \text{ lt}_s) - 0,053 k - 9,0 \text{ sil}}{1,00}$	$\frac{(100 - k_s - 9,0 \text{ sil}) - 0,053 k - 1,00 \text{ lt}}{9,0}$
XC2, XC3 XC4, XS1 XS2, XD1 XD2, XF1 XF3, XA1	$\frac{(100 - k_s - 0,25 k_s) - 2,22 \text{ lt} - 9,0 \text{ sil}}{0,25}$	$\frac{(100 - k_s - 2,22 \text{ lt}_s) - 0,25 k - 9,0 \text{ sil}}{2,22}$	$\frac{(100 - k_s - 9,0 \text{ sil}_s) - 0,25 k - 2,22 \text{ lt}}{9,0}$
XS3 XD3	$\frac{(100 - k_s - 0,25 k_s) - 2,22 \text{ lt} - 9,0 \text{ sil}}{0,25}$	$\frac{(100 - k_s - 3,33 \text{ lt}_s) - 0,25 k - 9,0 \text{ sil}}{3,33}$	$\frac{(100 - k_s - 3,33 \text{ lt}_s) - 0,25 k - 2,22 \text{ lt}}{9,0}$
XF2, XF4	Vaatimukset INfraRYL 2006 <i>Sillan betonirakenteet</i> kohdan 42020.1.2 mukaan		

Taulukossa on käytetty seuraavia merkintöjä:

Kaikki annosprosentit lasketaan alkuperäisestä sementistä,

k_s on sementin sisältämien kaikkien seosaineiden summa [%]

k_s on sementin sisältämä masuunikuonajauhe [%]

l_s on sementin sisältämä lentotuhka [%]

sil_s on sementin sisältämä silika [%]

k on sementin sisältämän ja lisätyn masuunikuonajauheen yhteismäärä [%]

It on sementin sisältämän ja lisätyn lentotuhkan yhteismäärä [%]

sil on sementin sisältämän ja lisätyn silikan yhteismäärä [%]

Lentotuhkalle sallittu enimmäismäärä betonissa on 45 %, mutta jos rakenne on kloridirasitukselle alttiina, enimmäismäärä on 30 % portlandsementtimäärästä (BY201 2018, s. 56). Varhaisen lujittumisen aikana lentotuhkalla ei ole merkitystä betonin kemikaalikestävyyteen, mutta jos myöhemmässä vaiheessa kosteutta on riittävästi käytettävissä, muodostaa lentotuhka pysyviä kovettumistuotteita kuluttaen samalla kalsiumhydroksidia. Tällainen prosessi parantaa betonin tiiveyttä ja kemiallista kestävyttä. (Iso-Mustajärvi 2016, s. 54)

Masuunikuonajauhetta käyttämällä voidaan parantaa betonin kemiallista kestävyttä, erityisesti sulfaatinkestävyyttä. Masuunikuonajauheen vaikutus kemikaalikestävyyteen perustuu osin sen betonia tiivistävään vaikutukseen. Kuonajauhe pienentää keskimääräistä huokoskokoa vaikuttamatta kuitenkaan kokonaishuokosmäärään. Tämä hidasta kloridien tunkeutumista betoniin ja on havaittu, että kuonajauheen osuuden ollessa 60 % sideainemäärästä, kloridien tunkeutumisvastus kasvaa kymmenkertaiseksi. Kuonajauheen pitoisuuden ollessa yli 70 % sideaineesta, sideaineyhdistelmä voidaan luokilla sulfaatinkestäväksi. Masuunikuonajauheen lisäys vähentää myös portlandsementin C_3A –pitoisuutta, joka on suoraan kytköksissä betonin sulfaatinkestävyyteen. (Iso-Mustajärvi 2016, s. 58) Sulfaatinkestäviä sementtejä ovat myös portlandsementit, joiden C_3A –pitoisuus on alle 5 % sekä pozzolaanisementit joiden C_3A –pitoisuus on alle 9 % (Iso-Mustajärvi 2016, s. 33).

Myös silikan käyttö seosaineena parantaa betonin tiiveyttä. Tiiveyden parantuessa paranee lisäksi betonin kemiallinen kestävyys, koossapysyvyys sekä vedenpitävyys. Silikan käytöllä halutaan yleensä vaikuttaa betonin lujuuteen, eikä kemiallisen kestävyuden paraneminen silikan lisäyksen johdosta ole kovin merkittävä. (Iso-Mustajärvi 2016, s. 58)

Seosaineiden käytössä tulee muistaa, että ne tyypillisesti nopeuttavat hieman betonin karbonatisoitumista. Erityisesti pozzolaaniset seosaineet nopeuttavat karbonatisoitumista, sillä ne reaktiossaan kuluttavat betonin emäksisyyttä ylläpitävää kalsiumhydroksidia. Masuunikuonajauhe nopeuttaa betonin karbonatisoitumista ensimmäisen kolmen kuukauden sen hitaamman kovettumisen takia. Tämän jälkeen karbonatisoitumisnopeus ei poikkea tavallisen betonin karbonatisoitumisnopeudesta. (Iso-Mustajärvi 2016, s. 55, 58)

4.2 Pinnoitteet

Betonin vaurioitumista kemiallisten rasitusten johdosta voidaan estää tai hidastaa pinnoittamalla betonipinta sopivalla aineella. Ennen betonilattian pinnoittamista tulee huolehtia, että betonirakenteen kosteuspitoisuus on riittävän alhainen sekä pinnoitettava pinta on puhdas. Pinnoite ei saa joutua liian suureen kosteusrasitukseen ja pinnan puhtaudella taataan pinnoitusaineen tartunta. Epoksi- ja akryylipinnoitteita käytettäessä betonin suhteellinen kosteus saa olla enintään 97 % mitatulla syvyydellä. Polyuretaanipinnoitteet ovat herkempiä kosteudella ja niiden sallima enimmäisarvo kosteudelle on 90 %. Kosteuspitoisuuden mittaussyvyyteen vaikuttaa betonilaatan paksuus. Pinnoitteen tartuntaa voivat heikentää esimerkiksi öljyt, liuottimet, maalit sekä jälkihoitoaineet. Tämän lisäksi täytyy varmistaa, ettei pinnassa ole kiinteitä epäpuhtauksia kuten pölyä tai hiekkaa. (BY54 2010, s. 29, 31, 33, 36)

Hyvä tapa suojautua kemikaaliroiskeilta on käyttää polymeeripinnoitetta. Tällaisissa ratituksissa ei ole suositeltavaa käyttää ohuita, pinnoitetyyppien 1...3 mukaisia pinnoitteita, sillä kalvopaksuus voi jäädä liian ohueksi. Pinnoitetyypit 1...3 sisältävät lähinnä liuotteettomia maaleja ja lakkoja sekä pinnoitteita, joiden kalvopaksuus on alle 0,5 mm. Pinnoitteen paksuus tulee olla siis vähintään 2 mm, joka on vähimmäisvaatimus pinnoitetyypin 4 paksuudelle. Pinnoitteita käytettäessä tulee huomioida, ettei se kestä pitkäaikaista altistusta kemikaaleille vaan tarjoaa vain väliaikaista suojaa. Pitkäaikainen altistus kemikaaleille on kuitenkin epätodennäköistä jo pelkästään niiden aiheuttamien työterveysongelmien takia. Pinnoitteiden suojavaikutus voi olla hyvinkin pitkäikäinen, jos huolehditaan riittävästä viemäroinnistä ja puhtaanapidosta. Toisin sanoen tällöin aggressiiviset kemikaalit eivät ole pitkiä aikoja vaikutuksissa pinnoitteen kanssa. Kemikaalit voivat myös aiheuttaa puhtaasti esteettisiä värimuutoksia betonipintaan vaikuttamatta kuitenkaan sen käyttöominaisuuksiin tai kestävyys. Pinnoite tulee valita aina tapauskohtaisesti eri kemikaalien sekä polymeerihartseja hyödyntävien lattiapinnoitteiden moninaisten ominaisuuksien vuoksi. (BY54 2010, s. 17, 19–20)

Voi- ja maitohapolta suojautuessa lattian kemiallinen pintakäsittely ei välttämättä ole riittävä. Tällaisissa tapauksissa voidaan käyttää laattoja, mutta tulee huomioida, että liitoksien on oltava haponkestäviä. Joskus betonin pinnoittamisessa voidaan jopa käyttää pellavaöljyä. Pellavaöljyn käyttö perustuu sen kykyyn muodostaa betonipintaan läpäisemätön kalvo. (Hewlett 2001, s. 335, 338) Mikäli lattia halutaan tyydyttävästi suojata aggressiivisilta hapoilta, on pinnoittaminen happoa kestäväällä pinnoitteella ainoa tapa (BY201 2018, s. 133).

Prosessiteollisuuden, elintarviketeollisuuden sekä yhdyskuntien vedenkäsittelylaitosten betonisten altainen suojaamiseen kemiallisilta rasituksilta voidaan käyttää liuotteettomia epoksinnoitteita. Tällaiset pinnoitteet parantavat rakenteen kemikaalinkestävyyttä, puhdistettavuutta ja tiiveyttä. Pinnoitus tehdään yleensä ilmattomalla ruiskulla, jolloin saadaan tiivis ja saumaton suojakerros betonille. (Teknos oy 2014, s. 19)

5. VAURIOITUMISNOPEUTEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

5.1 Sisäiset tekijät

Sisäisiä tekijöitä tarkasteltaessa keskitytään tässä tapauksessa betonin omiin kemiallisiin ja fysikaalisiin ominaisuuksiin. Monet betonia vaurioittavat mekanismit perustuvat betonin vedenläpäisevyyteen sekä veteen tai ilmaan liuenneisiin ioneihin (BY210 2008, s. 49). Betonin säilyvyyteen kemiallisessa rasituksessa vaikuttaa yleensä sen hajoamisnopeus. Tätä voi kiihdyttää esimerkiksi betonissa olevat halkeamat sekä suuri betonipinnan huokoisuus. (BY210 2008, s. 53).

Betonin vesitiiveys C30/37 luokan sekä tätä korkeampien lujuusluokkien betoneilla ei yleensä ole ongelma. Tätä pienemmillä lujuusluokilla, sekä käytettäessä karkeaa sementtiä tai vähäistä sideainemäärää, voi vesitiiveys muodostua ongelmaksi. (BY68 2016, s. 51)

Sementtikivessä voi olla viittä erilaista huokostyyppiä: geelihuokosia, kapillaarihuokosia, supistumishuokosia, suojahuokosia sekä tiivistyshuokosia. Näistä kapillaarihuokokset ovat betonille haitallisia, sillä ne mahdollistavat haitta-aineiden imeytymisen betoniin. Kapillaarisen vedenliikkeen myötä betoniin pääsee imeytymään esimerkiksi suoloja ja klorideja. Täysin hydratoituneessa betonissa ei ole kapillaarihuokosia vesi-sementtisuhteen ollessa alle 0,4, mutta työstettävyyden vaatii yleensä tätä suuremman suhteen. Vesi-sementtisuhteen ollessa alle 0,6, täysin hydratoituneen betonin kapillaarihuokosverkosto ei ole yhtenäinen eikä veden kapillaarinen liike ole mahdollista. Käytännössä nämä raja-arvot ovat teoreettisia ja todellisuudessa pienempiä, sillä betoni ei koskaan hydratoidu täysin. Sementtigeeli sulkee huokokset tietyn ajan kuluessa riippuen käytetystä vesi-sementtisuhteesta. Arvolla 0,4 tämä tapahtuu noin kolmen vuorokauden kuluessa ja arvolla 0,6 noin puolen vuoden kuluessa veden ja sementin sekoituksesta. Arvolla 0,7 tätä ei tapahdu ollenkaan vaan betoniin muodostuu yhtenäinen kapillaarihuokosverkosto. (BY201 2008, s. 81–84)

5.2 Ulkoiset tekijät

Betonin korroosionopeuteen vaikuttaa merkittävästi ympäristö, jonka kanssa se on kosketuksissa. Ympäristön huomiointi betonirakennetta tehdessä näkyy merkittävimmin määritettäessä rasitusluokkaa, ja tätä kautta monia muita vaatimuksia betonille. BY 68 (2016, s. 13) mukaan rasitusluokan valinta tulee vastata mahdollisimman hyvin todellisia

oloja ja rasituksia, sillä ylimitoitus tulee kalliiksi. Toisaalta liian ankaran rasisitusluokan valinta voi johtaa myös betonin muiden ominaisuuksien heikkenemiseen ja näin heikentää rakenteen laatua (BY68 2016, s. 13).

Tämän työn kannalta olennaisimpia rasisitusluokkia ovat XD- ja XS-, XA- sekä XC-rasisitusluokat. Näistä kaksi ensimmäistä huomioivat betonirakenteelle tulevat kloridirasitukset. Rasisitusluokkien XD1 - 3 tapauksessa kloridit tulevat muualta kuin merivedestä, kun taas rasisitusluokissa XS1 - 3 kloridit ovat peräisin merivedestä. XA-rasisitusluokat huomioivat erilaisten kemiallisten aineiden haitallisen vaikutuksen betonille. XC-rasisitusluokissa otetaan huomioon betonin karbonatisoituminen sekä sitä kiihdyttävät tekijät. (BY68 2016, s. 13–19, 23) Rasisitusluokkien vaatimukset betonille kasvavat kirjainyhdistelmän perässä olevan luvun kasvaessa. Mikäli määritettäessä XA-rasisitusluokkaa betonille, kaksi tai useampaa aggressiivista rasisitusta johtaa samaan rasisitusluokkaa, tulee luokka määrittää yhtä astetta korkeammaksi (BY68 2016, s. 28). Valittu rasisitusluokka määrittää raudoituksen betonipeitteen nimellisarvon, suurimman sallitun vesi-sementtisuhteen, lujuusluokan sekä sen, tuleeko betonirakenteessa käyttää sulfaatinkestävää sementtiä. Sulfaatinkestävän betonin käyttö ei välttämättä aina riitä, jolloin betoni tulee pinnoittaa. Edellä mainittuihin arvoihin vaikuttaa myös rakenteen suunniteltu käyttöikä, joka on yleensä joko 50 tai 100 vuotta. Jossain tapauksissa käyttöikä voi olla jopa 200 vuotta.

Rasisitusluokalla voidaan huomioida ympäristöolosuhteet vain tiettyyn pisteeseen saakka. Suoraan ympäristöstä tulevien haitta-aineiden lisäksi on hyvä pitää mielessä muun muassa lämpötilan ja ilmankosteuden vaikutus teräskorroosioon sekä virtauksen ja paineen vaikutus aggressiivisen liuoksen aiheuttamaan betonikorroosioon (BY201 2018, s. 109–110, 131).

6. VAURIOIDEN TUTKIMISTAVAT

Betonirakenteen vaurioitumisen haitat voivat aluksi olla pelkästään ulkonäöllisiä, mutta vaurioitumisen jatkuessa niistä voi tulla turvallisuusriskejä. Yleensä rakenteen näkyvät vauriot käynnistävät prosessin, joka sisältää kuntoarvion, kuntotutkimuksen sekä mahdollisen korjaushankkeen. Kuntoarvio sisältää tavallisesti ainoastaan silmämääräisen rakenteen tarkastuksen eikä se täten mahdollistakaan minkäänlaista ennakointia. Kuntotutkimus sen sijaan sisältää rakenteen kunnan selvittämisen hyödyntämällä erilaisia tutkimusmenetelmiä kuten mittausta, näytteenottoa ja laboratoriotutkimuksia. Nämä mahdollistavat vaurioiden synnyn, laajuuden ja vaikutusten tutkimisen jo ennen näkyvien vaurioiden syntymistä. Näin vaurioituminen voidaan pysäyttää ennen kuin siitä muodostuu todellisia haittoja. (BY201 2018, s. 553)

Näkyvien korroosiovaurioiden paikallistamiseen riittää toisinaan silmämääräinen tarkastelu. Pinnan hiekkapuhaltaminen voi helpottaa vaurioiden paikallistamista. Perusmenetelmänä toimii kuitenkin yleensä raudoitteiden esiin piikkaus. Piikkaus edellyttää, että kuntotutkimuksessa on määritetty mitattujen peitepaksuus- ja karbonatisoitumissyvyyksien tai kloridien tunkeutumissyvyyksien perusteella rajasyvyys, jota lähempänä pintaa oleva raudoite on piikattava esiin. Korroosiovaurioita tarkasteltaessa tulee ottaa huomioon aika, joka vaurion syntymiseen menee sekä suurten karbonatisoitumissyvyyksien yleisyys. Tämän lisäksi vaurioita voidaan paikallistaa potentiaalimittauksin. Tällöin vaaditaan, että raudoitteiden syvyydellä on niin kosteaa, että korroosio on varmasti käynnissä. Tätä voidaan hyödyntää esimerkiksi siltojen reunapalkkeja tutkittaessa. Raja-arvona mittaukselle pidetään -200 mV tai tätä negatiivisempaa arvoa kupari-sulfaattielektrodiä vasten mitattuna. (BY41 2016, s. 24)

Jos on syytä epäillä, että korroosio on käynnistynyt kloridien vaikutuksesta, voidaan mitata betonin kloridipitoisuus. Mikäli klorideja todetaan, tulee niiden alkuperä selvittää määrittämällä kloridiprofiili, jossa on esitetty betonin kloridipitoisuus eri syvyyksillä. Profiilin avulla selviää ovatko kloridit ulkoisen rasituksen seurausta vai betonimassan valmistuksen yhteydessä tulleita. (BY42 2002, s. 70–71)

Myös rapautumisvaurioiden paikallistaminen voidaan aloittaa silmämääräisellä tarkastelulla. Erityistä huomiota tulee kiinnittää rapautumisvaurioille ominaisiin piirteisiin kuten verkkohalkeiluun ja kalkkivalumiin. Jos vaurioita havaitaan, tulee tutkia rapautumisen laajuus ja sijainti. (BY42 2002, s. 71) Työnaikaisen paikallistamisen apuna voidaan käyt-

tää myös vasarointia. Piikkauskohta rajataan piikkausvastukseen perustuen ja rajaa voidaan tarpeen mukaan valvoa vetokokeiden avulla. Mikäli käytetään vesipiikkausta, menetelmä itsessään määrittelee sopivan piikkausrajan, sillä sen selektiivisyys ehjän ja rapautuneen betonin välillä on hyvä. Vetokokeet perustuvat nimensä mukaisesti betonin vetolujuuden testaamiseen. Vetolujuuden lisäksi tulee ottaa huomioon betonin murto-tapa. Tätä menetelmää käytettäessä tulee lisäksi ottaa huomioon, että alhaisen vetolujuuden syynä voi olla rapautumisen lisäksi myös heikko kiviaineksen laatu, tavoiteltua lujuuustasoa alhaisempi loppulujuus sekä betonissa jo ennestään oleva halkeilu. (BY41 2016, s. 22–23)

Alkalikiviainesreaktion vaurioita tutkittaessa tulee myös huomioida, että vaurioituminen alkaa yleensä rakenteen sisältä. Tällaiset rapaukset ovat siis tyypillisesti syvemmällä kuin esimerkiksi pakkasrapaukset. (BY41 2016, s. 23) Luotettavin tapa alkalikiviainesreaktion todentamiseen on betonin ohuthietutkimus. Se ei kuitenkaan yksinään riitä vaan tämän lisäksi tulee myös suorittaa vetokoe. (Lahdensivu et al. 2018, s. 41) Ohuthietutkimusta voidaan hyödyntää myös ettringiitin muodostumista tutkittaessa (Lahdensivu 2012, s. 34). Taulukossa 3 on lueteltu erilaisia tapoja paikallistaa rapaumavauriot sekä arvioitu niiden soveltuvuutta eri vaiheissa.

Taulukko 3. Rapaumavaurioiden paikallistamistapoja sekä niiden soveltuvuutta korjaushankkeen eri vaiheissa (BY41 2016, s. 22).

	Menetelmän tarkkuus		Soveltuvuus eri vaiheissa		
	Rapautumisaste	Edustavuus	Kunto-tutkimus	Suunnit-telu	Toteutus
Silmämääräinen arviointi	Erittäin pitkälle edennyt	Erittäin laaja	+	(+)	+
Vasarointi	Erittäin pitkälle edennyt	Laaja	+	(+)	+
Vetokoe	Pitkälle edennyt	Pistemäinen	+	+	+
Ohuthie / Pintahie	Alkava	Pistemäinen	+	(+)	-
Mek. piikkaus	Pitkälle edennyt	Pistemäinen	-	-	+
Vesipiikkaus	Alkava	Laaja-alainen	-	-	+
+ = soveltuu käytettäväksi (+) = ei yleensä käytetä - = ei yleensä soveltu käytettäväksi					

7. YHTEENVETO

Ympäristöolosuhteiden huomiointi on tärkeä osa rakennesuunnittelijan suunnitteluprosessia sekä rakenteen oikeaoppista mitoittamista. Mikäli on mahdollista, että rakenne joutuu alttiiksi kemiallisille rasituksille, on yleensä syytä tehdä tarkempia tutkimuksia rasituksen laajuudesta ja aggressiivisuudesta. Rasituksen voimakkuuteen vaikuttaa myös muuttuvat olosuhteet, kuten lämpötila ja ilmankosteus, joiden ennakointi voi olla vaikeaa.

Betonin side- ja runkoainetta seosaineilla korvaamalla sekä betonia pinnoittamalla voidaan vaikuttaa sen kemikaalikestävyyteen. Jos rasitus on hyvin aggressiivinen, voi olla, ettei mitkään suojauskeinot ole riittäviä vaan ainoa keino suojella betonia on poistaa tai vähentää rasitusta. Seosaineiden käytössä tulee kuitenkin muistaa, että niiden käytöllä on myös haittavaikutuksia.

Mikäli vaurio pääsee syntymään, on erilaisten kemiallisen rasitusten vauriomekanismien tuntemus hyödyksi rasitustekijää paikallistettaessa. Aina vaurion pintapuolinen tarkastelu ei kuitenkaan ole riittävää, sillä erilaisten rasitustekijöiden aiheuttamat vauriot voivat olla hyvinkin samankaltaisia. Tällöin on syytä suorittaa tarkempia tutkimuksia.

LÄHTEET

- Arel H. S., Aydin E. ja Kore S. (2017). Ageing management and life extension of concrete in nuclear power plants, *Powder Technology*, nro 321, s. 390-408.
- Asp-Lehtinen M. (2018). KEB-61050 Kemian perusteet, luentomateriaali, Tampereen Teknillinen Yliopisto, Tampere.
- Barnes P., Bensted J. (2008). *Structure and Performance of Cements (Second Edition)*. Taylor & Francis Group, 565 s.
- BY41 (2016). Betonirakenteiden korjausohjeet 2016, Suomen betoniyhdistys ry. Helsinki. 115 s.
- BY42 (2002). Betonijulkisivun kuntotutkimus 2002, Suomen betoniyhdistys ry. Helsinki. 179 s.
- BY54 (2010). Betonilattioiden pinnoitusohjeet 2010, Suomen betoniyhdistys ry. Helsinki. 64 s.
- BY65 (2016). Betoninormit 2016, Suomen betoniyhdistys ry. Helsinki. 130 s.
- BY68 (2016). Betonin valinta ja käyttöikäsuunnittelu – opas suunnittelijoille, Suomen betoniyhdistys ry. Helsinki. 95 s.
- BY201 (2018). Betonitekniikan oppikirja 2018, Suomen betoniyhdistys ry. Helsinki. 568 s.
- BY210 (2008). Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008, Suomen betoniyhdistys ry. Helsinki. 711 s.
- Davies, R. (2005). Concrete service in aggressive industrial environments, *The Concrete Society*, nro 39(6), s. 32–35
- Geologian tutkimuskeskuksen selvitys sulfaattimaiden esiintyvyydestä. Saatavissa (viitattu 9.3.2019): <https://gtkdata.gtk.fi/hasu/index.html>
- Hewlett P. (2001). *The Chemistry of Cement and Concrete (Fourth Edition)*. Edward Arnold (Publishers), 727 s.
- Iso-Mustajärvi P. (2016). RAK-32200 Betonitekniikka, luentomoniste, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere, 2013. 298 s.
- Köliö A., Honkanen M., Lahdensivu J., Vippola M. ja Pentti M. (2015). Corrosion products of carbonation induced corrosion in existing reinforced concrete facades, *Cement and Concrete Research*, nro. 78, s. 200–207
- Köliö A. (2016). Propagation of Carbonation Induced Reinforcement Corrosion in Existing Concrete Facades Exposed to the Finnish Climate. Tampereen teknillinen yliopisto. Julkaisu 1399. 61 s.

Lahdensivu J. (2012). Durability Properties and Actual Deterioration of Finnish Concrete Facades and Balconies. Tampereen teknillinen yliopisto. Julkaisu 1028. 117 s.

Lahdensivu J., Kekäläinen P. ja Lahdensivu A. (2018). Alkali-silica Reaction in Finnish Concrete Structures, Nordic Concrete Research, nro 59, s. 31–44

Larreuer-Cayol, S., Bertron A., ja Escadeillas G. (2011). Degradation of cement-based materials by various organic acids in agro-industrial waste-waters, Cement and Concrete Research, nro 41, s. 882-892.

Mattila J., Pentti M. (2004). Suojaustoimien tehokkuus suomalaisissa betonijulkisivuissa ja parvekkeissa. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan osasto. Talonrakennustekniikan laboratorio. Tutkimusraportti 123. TTY-PAINO. 69 s.

Public Water Supply, Chapter (McGraw-Hill Professional, 2014 2007 2001), AccessEngineering

Pyy H. (2018). Alkalikiviainereaktio – miten tähän on tultu ja miten tästä eteenpäin, Betoni, 4/2018, s. 90–95

RIL 256-2016 (2016). Paalutusohje PO-2016. Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry. 296 s.

Rozière, E., Loukili A., El Hachem R., ja Grondin F. (2009). Durability of concrete exposed to leaching and external sulphate attacks, Cement and Concrete Research, nro 39, 2009, s. 1188-1198

SFS-EN 206 (2016). Betoni. Määrittely, ominaisuudet, valmistus ja vaatimustenmukaisuus

Teknos oy 2014. Pintakäsittelyn käsikirja. Saatavissa (viitattu 5.4.2019): <https://www.teknos.com/fi-FI/teollisuus/aineistot/>